

УДК 629.78

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ФОРМАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКОМ TERRASAR-X****В.М. ЧЕРТКОВ, кан. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ****(Полоцкий государственный университет);****кан. техн. наук Н.М. НАУМОВИЧ****(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**

Среди существующих спутников радиолокационного зондирования Земли TerraSAR-X – один из наиболее востребованных, так как позволяет получать радиолокационные изображения с высоким пространственным разрешением. Базовыми продуктами данного спутника являются обработанные до уровня 1 В радиолокационные данные, для описания которых используется набор файлов и каталогов. Рассмотрены особенности представления основных и вспомогательных данных спутника TerraSAR-X, описана структура выходного продукта данного спутника. Синтезирован алгоритм преобразования и записи данных в формат COSAR с использованием программного обеспечения MatLab.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, формат данных, TerraSAR-X.

**Введение.** Системы дистанционного зондирования Земли на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны позволяют получать детальные радиолокационные изображения местности с качеством близким к оптическим системам, но при любых метеоусловиях и в любое время суток [1, 2]. Среди существующих спутников радиолокационного зондирования Земли TerraSAR-X является одним из наиболее востребованных и позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) с высоким пространственным разрешением, до 1 м [3]. Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) спутника выполняет съемку в X-диапазоне длин волн с частотой 9,65 ГГц и длиной волны соответственно 3 см. Базовые продукты данного спутника представляются обработанными до уровня 1 В изображениями, которые содержат следующие геометрические проекции и представления данных [3, 4]: Single Look Slant Range Complex (SSC) – комплексные РЛИ с наклонной дальностью с амплитудно-фазовыми параметрами в геометрии наклонной дальности; Multilook Ground Range Detected (MGD) – РЛИ с коррективкой по WGS84 со средней высотой местности для проекции с наклонной на горизонтальную дальность; Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) – РЛИ с коррективкой по WGS84 со средней высотой местности; Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC) – РЛИ с коррективкой по WGS84 с цифровой моделью рельефа. Разнообразие базовых продуктов основных радиолокационных данных спутника и различных вспомогательных данных, которые к тому же могут динамически дополняться, предопределило представление базового продукта в виде набора файлов и каталогов, которые упакованы в отдельный архив. При этом метаданные записаны в отдельный файл с использованием языка XML в качестве их описания. Для записи радиолокационных данных спутника TerraSAR разработан и используется специализированный формат COSAR [4]. Данная работа направлена на выявление особенностей структуры и формата представления радиолокационных данных спутником TerraSAR.

**Структура пакета данных спутника TerraSAR-X.** Выходной продукт данного спутника представляет собой архив (\*.tar) со структурой каталогов и файлов, в которых отдельно хранятся РЛИ и метаданные о режиме съемки, времени и координатах нахождения летательного аппарата, информация о коррекции и геокодировании, параметры качества информации, конфигурация съемочной системы и т.д. [2].

На рисунке 1 представлена структура выходного продукта спутника TerraSAR-X.

Основной файл метаданных, XML-файл, содержит информацию обо всех каталогах и файлах выходного продукта и включает основные разделы:

- *generalHeader* – хранит информацию о наземной станции;
- *productComponents* – представляет информацию о файловом составе выходного продукта;
- *productInfo* – содержит информацию о параметрах режима съемки, получения, передачи и хранения радиолокационной информации;
- *productSpecific* – представляет информацию о геокодировании и режиме съемки SSC;
- *setup* – описывает конфигурацию режима съемки и обработки данных и содержит информацию об уровне обработки выходного продукта, поляризационных каналах съемки и используемом программном обеспечении;
- *processing* – включает параметры обработчика и получаемых данных во время съемки, тип применяемых геометрических координат, результаты анализа и коррекции, геометрические параметры фо-

кусировки данных, также содержит параметры оценки и вычисления доплеровского центроида и флаги, указывающие, какие этапы обработки были выполнены;

– *instrument* – описывает параметры радиолокационного сенсора во время получения «сырых» (необработанных) данных;

– *calibration* – хранит параметры применения радиометрических и других поправок над полученными данными, которые использовались для калибровки, включая абсолютный коэффициент калибровки без масштабирования процессором, общую временную задержку, вносимую электронными приборами, калибровочные коэффициенты;

– *noise* – описывает шум и содержит идентификатор его модели, опорный уровень и время нестабильности шума, полиномы мощности шума как функции дальности в зависимости от опорных временных отсчетов азимута;

– *platform* – включает координаты антенн PCA, GPS антенны относительно спутниковой системы, основной сегмент, описывающий файл орбит через сегменты векторов состояний, привязанных к географическим координатам и пикселям радиолокационного изображения;

– *productQuality* – описывает качество изображения, данных и пределы их валидных значений.

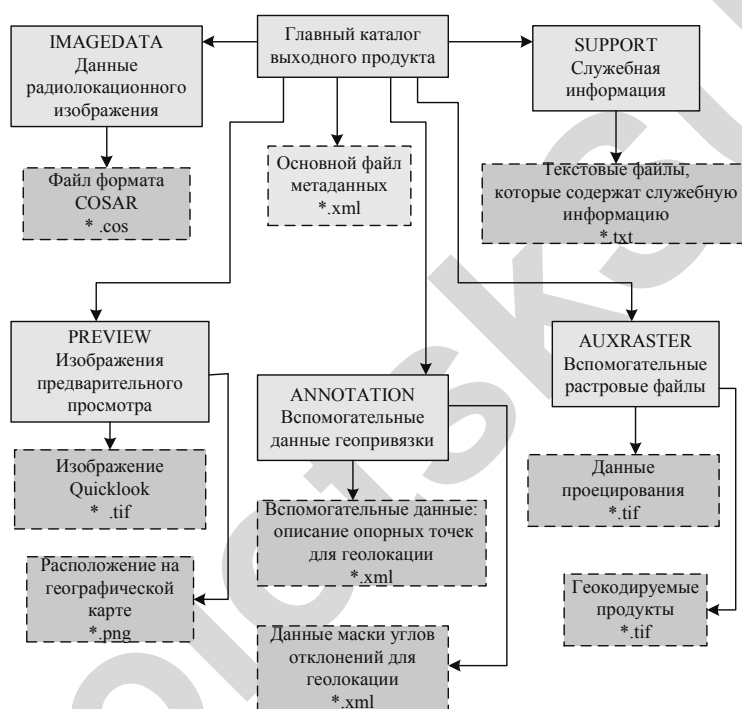


Рисунок 1. – Структура каталогов и файлов выходного продукта спутника TerraSAR-X

**Изображения предварительного просмотра.** В данном каталоге располагаются изображения небольшого размера для обеспечения возможности их быстрого просмотра, а также общая карта с отображением местоположения съемки. Изображения Quicklook являются масштабированными копиями РЛИ до 2000 пикселей по высоте, размер определяется типом изображения, режимом съемки и видом выходного продукта спутника. В случае отображения нескольких поляризационных слоев изображение представляется 24-битным цветным изображением формата TIFF, а каждый слой цвета соответствует определенному каналу поляризации. Также приводится меньший точечный рисунок растрового изображения в градациях серого в формате JPEG или TIFF с размером до 1000 пикселей по высоте.

**Особенности представления данных радиолокационного изображения в формате COSAR.** Полученные от PCA спутника TerraSAR-X данные отраженного радиосигнала в комплексном виде хранятся в файле формата COSAR. В зависимости от режима съемки спутника в файле может находиться ряд пакетов. Если для каждого канала поляризации система PCA использует несколько излучающих радиосигналов, то информация для каждого отраженного сигнала записывается в отдельных файл.

Сформированный для передачи пакет хранит метаданные, включая информацию о пригодности основных данных для дальнейшей обработки, и данные РЛИ в виде прямоугольной матрицы, в которой каждый столбец соответствует определенному расстоянию по дальности и содержит информацию о данных азимута. Расположение пакетов данных в файле COSAR показано на рисунке 2.

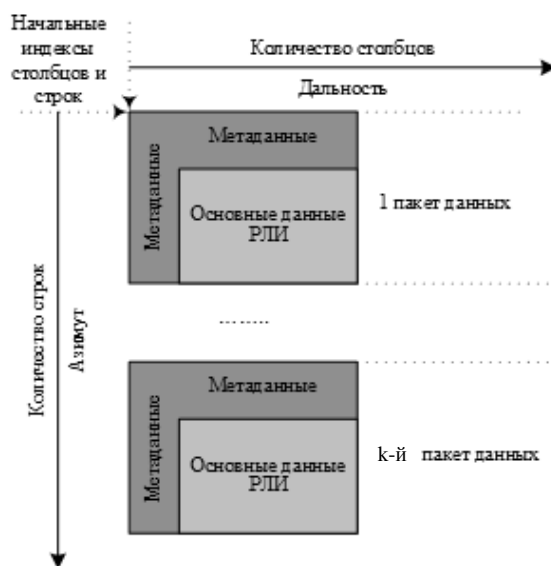


Рисунок 2. – Схема расположения пакетов данных в файле COSAR

Метаданные располагаются в первых четырех строках и в начале каждой последующей строки (рис. 3). Вспомогательные данные, записанные в первых четырех строк, повторяются в каждом сформированном пакете и содержат информацию о радиопередаче и общую информацию о сформированном файле. В первую строку каждого пакета заносятся следующие параметры (рис. 4):

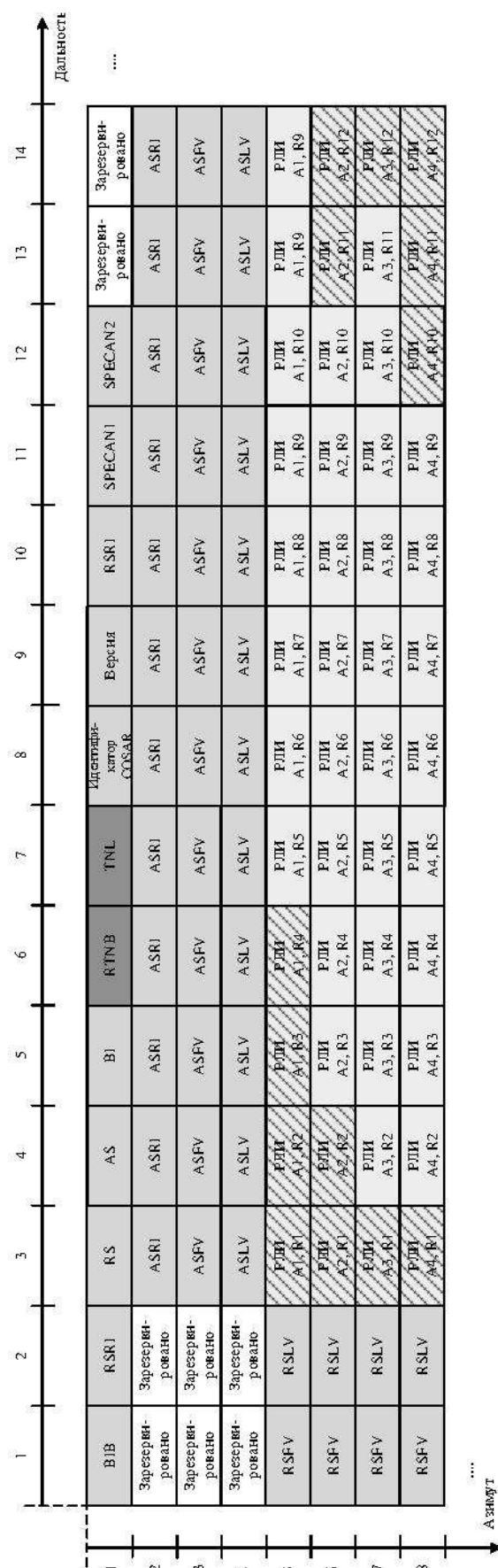
- число байт в текущей передаче (BIB);
- индекс дальности, который отражает расположение первой выборки дальности на виртуальном растре относительно эталонного значения (RSRI);
- количество строк, хранящих значения по дальности (RS);
- количество азимутальных столбцов (AS);
- индекс номера радиопередачи (BI);
- общее количество байт в строке в направлении дальности (RTNB);
- общий размер азимутальных строк (TNL);
- частоту дискретизации первой выборки по отношению к текущей выборке дальности (1 для 330 МГц, 2 для 165 МГц, 3 для 110 МГц);
- идентификатор COSAR файла и версии сформированного файла;
- вещественную переменную с плавающей точкой, значение которой обратно скорости масштабирования, применяемой в обработке данных;
- неиспользованные 32-битные числа в каждой строке пакета зарезервированы для вспомогательных данных, которые могут содержать дополнительные сведения о режимах формирования зависимой информации, полезной для интерферометрической обработки сложных данных.

Основные данные в файле COSAR представляются 32-битными числами в комплексном виде: 16 бит для мнимой части и 16 бит для действительной части. Вспомогательные данные хранятся в виде 32-битного целого числа. Порядок следования байт в файле обратный, т.е. старший байт представляется первым. Ячейка с именем идентификатора COSAR представляет собой 32-битное целое с постоянным значением в шестнадцатеричной системе счисления.

Отличительной особенностью COSAR формата является хранение данных РЛИ в искаженной или исправленной геометрии. Выбор геометрии для хранения данных определяет размер формируемого файла COSAR и зависит от полученной сцены радиолокационного снимка, т.е. положения спутника относительно сцены. Информация об искажении РЛИ представляется метаданными, которые записываются в файл COSAR совместно с основными данными РЛИ.

Общий вид данных в столбцах азимутной выборки представлен на рисунке 5. Данные делятся на три категории: метаданные, верные и искаженные данные. Вспомогательные данные азимутальной выборки представляются по три 32-битных числа в каждом столбце азимутальной выборки, описывающие следующие параметры:

ASRI – Азимутальный параметр выборки. Представляет расположение первого образца фактического столбца азимута относительно нулевого доплеровского расположения ссылочной выборки в промежуточном растре. Этот индекс не только определяет местоположение отдельных пакетов, но и также позволяет хранить данные перекошенного изображения;



**Рисунок 3. – Структура представления данных в файле COSAR**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	2095982080	0	18878	27750	1	75520	27754	1129529682	1	2	0	0	2139062143	2139062143	2139062143
<i>I</i>	BIB	RSRI	RS	AS	BI	RTNB	TNL	Идентификатор COSAR	Версия	RSRI	SPECAN1	SPECAN2	Зарезервировано	Зарезервировано	Зарезервировано

**Рисунок 4. – Расположение метаданных в первой строке файла COSAR**

ASFV – номер ячейки первой верной хранящийся азимутальной выборки в столбце. Индекс азимута начинается с 1;

ASLV – последняя верная ячейка азимутальной выборки в столбце.

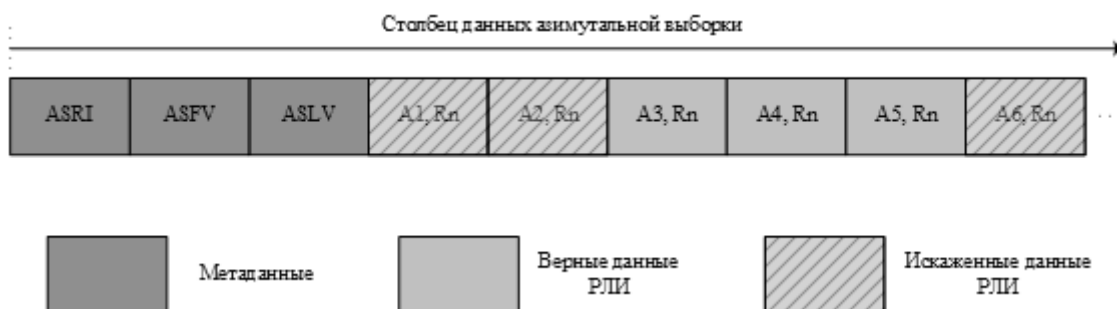


Рисунок 5. – Описание данных азимутной выборки

Таким образом, устранение искажения изображения и расположения начала колонки верных данных выборок азимута начинается с ячейки под номером ASRI+ASFV-1. В случае если перекося изображения имеет место, то параметр ASRI является постоянным для всех столбцов по дальности всего пакета.

Величина задержки первой выборки данных дальности является постоянной в пакете данных и указана в первой строке метаданных в начале пакета.

Каждая строка данных выборки дальности содержит два параметра метаданных и данные РЛИ соответственно, общий вид строки данных выборки дальности представлен на рисунке 6, где:

RSFV – номер ячейки первой верной выборки дальности в строке; нумерация индекса дальности начинается с 1.

RSLV – последняя верная ячейка выборки дальности в строке.

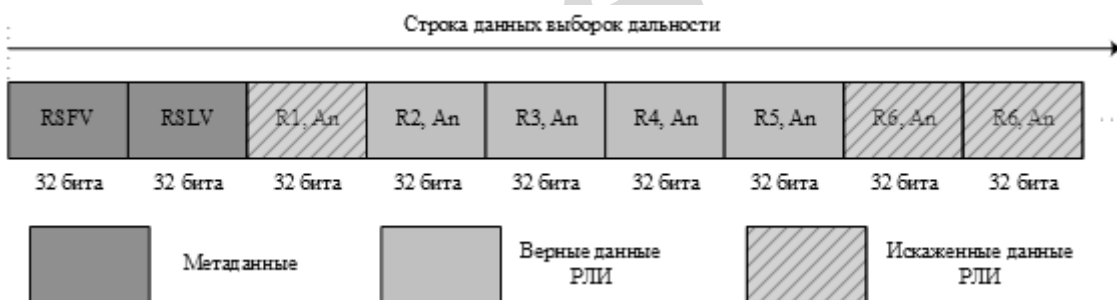


Рисунок 6. – Описание данных выборки по дальности

Число азимутных выборок в одном столбце может изменяться от передачи к передаче, а число выборок дальности в одной строке всегда одинаково для каждого пакета в сформированном файле.

**Вспомогательные данные геопривязки.** В формате COSAR также предусмотрено хранение вспомогательных данных геопривязки РЛИ к местности. При этом для каждой опорной точки определяются следующие параметры: привязка к опорному времени азимута, привязка к опорному времени наклонной дальности, широта, долгота, номер строки и номер столбца полученного массива раstra COSAR изображения, углы падения и элевации.

**Вспомогательные растровые файлы.** В данном разделе размещаются данные проецирования и данные геокодирования. Процедура геокодирования выполняет развертывание полученного РЛИ в соответствии с направлением севера [3].

**Результаты моделирования представления данных в формат COSAR.** С учетом рассмотренной структуры представления радиолокационных данных спутником TerraSAR-X синтезирован и реализован алгоритм представления данных в формат COSAR с использованием программного обеспечения MatLab, который включает следующие основные шаги:

- импорт сфокусированного РЛИ с геометрической коррекцией;
- формирование основных и вспомогательных данных на основе импортированного РЛИ;
- вывод в файл первой строки основных и вспомогательных данных;
- перестановка пикселей для удобства конкатенации двух 16-битных чисел в 32-битное число;

- формирование вспомогательных данных о перекосе изображения;
- преобразование раstra РЛИ в одномерный массив;
- конкатенация 16-битных чисел в 32-битное число;
- вывод данных.

Для реализации алгоритм представления данных в формат COSAR в пакете MatLab реализованы и используются следующие основные функции:

- RLI\_open\_complex – чтение комплексных данных радиолокационного изображения;
- asdata\_form – формирование верных и искаженных данных азимутальной выборки;
- header\_write – заполнение заголовка первой строки (листинг 1);
- rsdata\_form – формирование верных и искаженных данных выборок по дальности;
- rek\_rli – реструктуризация данных РЛИ (листинг 2);
- COSAR\_data – формирование данных COSAR файла.

Листинг 1 – Функция заполнения заголовка первой строки формата COSAR

```
function [header] = header_write(height, width, asri, asfv, aslv)
% height : высота РЛИ
% width : ширина РЛИ
% asri : вектор азимутальных параметров для каждой выборки азимута
% asfv : вектор, содержащий номера ячеек первых верных данных в азимутальной выборке
% aslv : вектор, содержащий номера ячеек последних верных данных в азимутальной выборке
    header=zeros(4,width); % заполнение основного заголовка нулями
    header(1,1)=4*(width)*(height+4); % число байт в текущей передаче (BIB)
    header(1,2)=1; % индекс дальности, который отражает расположение первой выборки дальности на
    виртуальном растре относительно эталонного значения (RSRI)
    header(1,3)=width-2; % количество строк, хранящих значения по дальности (RS)
    header(1,4)=height; % количество азимутальных столбцов (AS)
    header(1,5)=1; % индекс номера радиопередачи (BI)
    header(1,6)=4*(width); % общее количество байт в строке в направлении дальности (RTNB)
    header(1,7)=height+4; % общий размер азимутальных строк (TNL)
    header(1,8)=1129529682; % идентификатор COSAR файла
    header(1,9)=1; % версия сформированного файла
    header(1,10)=2; % частота дискретизации первой выборки по отношению к текущей выборке даль-
    ности (1 для 330 МГц, 2 для 165 МГц, 3 для 110 МГц)
    header(1,11)=0; % скорость масштабирования
    header(1,12)=0; % скорость масштабирования
    header(1,13)=2139062143; % зарезервированные и неиспользуемые данные
    header(1,14)=2139062143; % зарезервированные и неиспользуемые данные
    header(1,15)=2139062143; % зарезервированные и неиспользуемые данные
    header(1,16:width)=2139062143; % зарезервированные и неиспользуемые данные
    header(2:4,1:2)=2139062143; % зарезервированные и неиспользуемые данные
    header(2,3:width)=asri(3:width); % информация о верных и искаженных выборках по азимуту
    header(3,3:width)=asfv(3:width);
    header(4,3:width)=aslv(3:width);
    header=uint32(header); % преобразование вектора к формату чисел uint32
    header=swapbytes(header); % циклическая перестановка младших байт со старшими
    header=header'; % транспонирование вектора
end
```

Листинг 2 – Функция реструктуризации данных РЛИ согласно формату COSAR

```
function img = rek_rli(RLI,height,width)
% RLI : комплексное радиолокационное изображение
% height : высота изображения
% width : ширина изображения

    img = RLI'; % транспонирование изображения
    img = uint16(img(:)); % преобразование данных в формат uint16
    img = typecast(img,'uint32'); % объединение комплексной и действительной составляющих
    img = reshape(img, width-2,height); % изменение порядка чтения пикселей изображения
    img = swapbytes(samples); % циклическая перестановка младших байт со старшими
end
```

На рисунке 7 приведен пример сфокусированного радиолокационного изображения ERS-2 [5] по рассмотренной в [6] методике, которое преобразовано по разработанному алгоритму в формат COSAR с использованием MatLab.

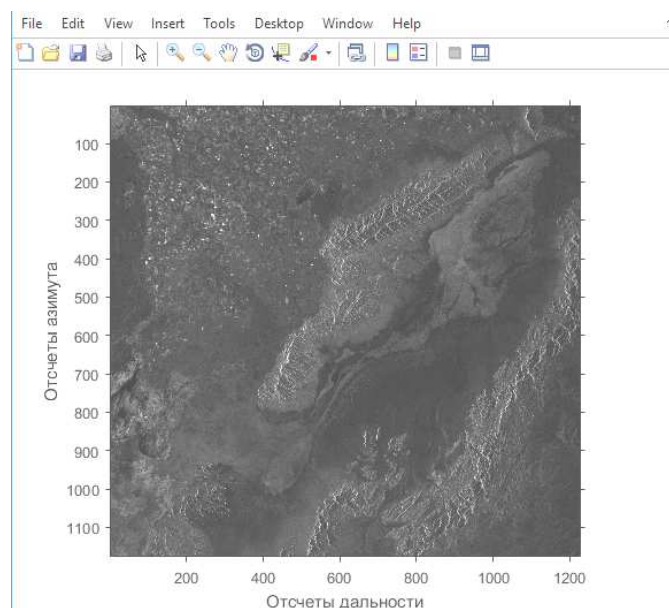


Рисунок 7. – Сфокусированное радиолокационное изображение спутника ERS-2, преобразованное в формат COSAR

**Заключение.** Рассмотрены особенности структуры и формата представления радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли спутником TerraSAR. Полученные от PCA спутника данные отраженного радиосигнала в комплексном виде хранятся в файле формата COSAR. Основной файл метаданных представлен XML файлом и содержит вспомогательные данные и информацию обо всех каталогах и файлах выходного продукта. Синтезирован и реализован алгоритм представления данных в формат COSAR с использованием программного обеспечения MatLab.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования // В.С. Верба [и др.]. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Hein, A. Processing of SAR data: fundamentals, signal processing, interferometry: Springer / A. Hein. – Berlin, 2004. – P. 292.
3. Самые точные и детальные геопространственные данные. TerraSAR-X, TanDEM-X [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://innoter.com/satellites/931>.
4. Document specifying the format of delivery, data structure, metadata information of TerraSAR-X data products [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r460\\_9\\_030201\\_level-1b-product-format-specification\\_1.3.pdf](http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r460_9_030201_level-1b-product-format-specification_1.3.pdf).
5. Geohazard Supersites and Natural Laboratories [Electronic resource]. – Mode of access: [http://eo-virtual-archive4.esa.int/search/ER02\\_SAR\\_RAW\\_OP/ER02\\_SAR\\_IM\\_OP\\_20110701T182202\\_20110701T182219\\_DPA\\_84681\\_0000.CEOS.tar/html](http://eo-virtual-archive4.esa.int/search/ER02_SAR_RAW_OP/ER02_SAR_IM_OP_20110701T182202_20110701T182219_DPA_84681_0000.CEOS.tar/html).
6. Моделирование алгоритма формирования радиолокационного изображения на основе представленных в формате CEOS необработанных данных дистанционного зондирования Земли / Р.П. Богуш [и др.] // Вестник Полочского государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 13–21.

Поступила 02.03.2017

#### FEATURES STRUCTURE AND FORMAT OF PRESENTATION OF RADAR SATELLITE DATA TERRASAR-X

V. CHERTKOV, R. BOHUSH, N. NAUMOVICH

*TerraSAR-X is one of the most demanded, because it allows obtaining radar images with high spatial resolution. The basic products of the satellites are processed to the level 1B radar data. It uses a set of files and directories to describe the data. The paper discusses the features of representation of primary and secondary data satellite TerraSAR-X, describes the structure of the output product of the satellite. The algorithm of writing data into format COSAR using MatLab software is presented.*

**Keywords:** radar image, SAR, data format, TerraSAR-X.